

Periodo de iniciación de la corrosión por ión cloruro según la EHE 08 en elementos de hormigón fisurados

Initiation period of corrosion by chloride ion according to EHE 08 in cracked concrete elements

J. Torres ^(*), C. Andrade ^(**), J. Sánchez ^(*)

RESUMEN

El transporte de cloruro en el hormigón por difusión es un problema extensamente estudiado para determinar la vida útil de las estructuras en ambientes marinos. Sin embargo, cuando el hormigón se encuentra fisurado no existe un procedimiento que permita calcular el transporte de los cloruros. Los Códigos limitan el ancho de las fisuras según el tipo de ambiente de exposición. En este trabajo se estudia la relación del ancho de fisura con el coeficiente de difusión y se estima el periodo de iniciación de la corrosión por cloruros en hormigones fisurados. Se ha obtenido una ley que permite predecir la variación del tiempo de iniciación de la corrosión en función del ancho de la fisura.

Palabras clave: Coeficiente de difusión, cloruros, hormigón, fisuras, periodo de iniciación.

ABSTRACT

The transport of chloride in concrete by diffusion is a problem widely studied to determine the service-life of structures in marine environments. However, there is no procedure to calculate the chlorides transport when the concrete is cracked. The standards limit the width of the cracks according to the type of exposure environment. In this paper, the relation of the crack width with the diffusion coefficient is studied and the initiation time of chloride-induced corrosion in fissured concrete is estimated. A law has been obtained that allows to predict the variation of the corrosion initiation time according to the width of the crack.

Keywords: Diffusion coefficient, chlorides, concrete, cracks, period of initiation.

^(*) Instituto Ciencias de la construcción Eduardo Torroja, Madrid (España)

^(**) Centro Internacional de métodos numéricos en Ingeniería, Barcelona (España)

Persona de contacto/Corresponding author: juliotorres@ietcc.csic.es (J. Torres)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1261-9199> (J. Torres); <http://orcid.org/0000-0003-2374-0928> (C. Andrade); <http://orcid.org/0000-0002-4334-0553> (J. Sánchez)

Cómo citar este artículo/Citation: Torres, J.; Andrade, C.; Sánchez, J. (2020). Periodo de iniciación de la corrosión por ión cloruro según la EHE 08 en elementos de hormigón fisurados. *Informes de la Construcción*, 72(557): e331. <https://doi.org/10.3989/ic.70275>

Copyright: © 2020 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 01/02/2019
Aceptado/Accepted: 29/03/2019
Publicado on-line/Published on-line: 10/03/2020

1. INTRODUCCIÓN

La difusión de cloruros en el hormigón ha sido estudiada desde hace varias décadas (1, 2, 3, 4, 5) debido a que la llegada hasta la armadura de una cierta concentración llamada “límite” produce la corrosión del acero y por tanto afecta a la seguridad de la estructura (7, 8). Todos los estudios han llevado a que tanto en la Instrucción española, EHE-08 (9) como en el Código Modelo (10) se hayan incorporado modelos de cálculo para establecer el tiempo de “vida útil” (sin corrosión) de una determinada estructura. Estos modelos son todavía bastante genéricos e imprecisos (11) ya que no se conoce todavía como modelar el ambiente exterior y por ello no es posible establecer con exactitud los tiempos hasta corrosión de la armadura. Así, el tiempo hasta corrosión depende de la concentración de cloruros exterior y de un fenómeno llamado “envejecimiento”, “aging” en inglés (6), que produce que el coeficiente de difusión de los cloruros disminuya con el paso del tiempo y sin que se sepa bien cuáles son las leyes que lo rigen (11). Estas incertidumbres no han impedido, sin embargo, que los modelos de difusión basados en la resolución de la segunda ley de Fick, se empiecen a emplear, precisamente porque es necesario establecer sus límites de aplicación y conocer mejor como se adaptan a casos reales (12, 13).

Los modelos disponibles hasta el momento siempre se han ensayado sobre estructuras o probetas no fisuradas y son muy escasos, debido a las dificultades experimentales, los trabajos en elementos fisurados. En una estructura real habrá elementos fisurados y otros no, sin que hasta ahora se haya detectado que las zonas fisuradas se corroan antes o más rápidamente que las no fisuradas, tal vez porque las zonas que se corroen antes dependen también de la concentración exterior y los espesores de recubrimiento que pueden ser diferentes en los diferentes elementos. En todo caso es muy útil conocer si existe alguna relación constante entre el ancho de fisura y el coeficiente de difusión de los cloruros a nivel de laboratorio y tratar de comprobar después su validez en estructuras reales.

De forma conceptual, la aparición de fisuras en el hormigón reduce la barrera que supone la presencia de un recubrimiento y cabe esperar que modifique la vida útil de la estructura, tanto el periodo de iniciación como el de propagación (1, 2, 3, 4, 5). Pocos autores, como se ha mencionado han abordado este problema y los que lo han hecho han adoptado técnicas experimentales diversas y variados objetivos (14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21). Unos han medido la influencia del ancho de fisura observando casos reales (14, 15) pero sin cuantificar el proceso, y otros han tratado de simular las fisuras mediante elementos finitos (16) o han medido como se distribuyen los cloruros aportando los perfiles en profundidad y laterales

(17). Unos pocos han tratado de acelerar el proceso mediante ensayos de migración iónica y han establecido relaciones entre el ancho de fisura y los coeficientes de difusión medidos (18, 19, 20, 21). En este trabajo se determina precisamente el coeficiente de difusión en probetas con anchos de fisuras controladas siguiendo el método propuesto por Baroghel-Bouny et al. (19), siempre simulando fisuras que llegan hasta la armadura de refuerzo, que son las más dañinas desde un punto de vista de la vida útil. A los resultados obtenidos se han aplicado con intención ilustrativa los modelos sugeridos en la EHE-08, con los que se ha obtenido la variación del periodo de iniciación con el ancho de fisura.

2. METODOLOGÍA

Para estudiar el efecto de las fisuras en el transporte de cloruros, se fabricaron probetas de hormigón de tres composiciones diferentes que se fisuraron a tracción indirecta y se sometieron a ensayos acelerados de cloruros. Estos ensayos acelerados utilizan corriente eléctrica (22).

2.1. Materiales

Se fabricaron probetas cilíndricas, de 75 mm de diámetro y de 150 mm de altura, con 3 tipos de hormigón, con tres cantidades de cemento diferentes. En la Tabla 1 se muestra su dosificación.

Tabla 1. Dosificaciones de hormigones utilizados.

	300 kg	360 kg	400 kg
Agua (kg)	150	180	200
Cemento I 52,5R (kg)	300	360	400
a/c efectiva	0,5	0,5	0,5
Grava (4/8) (kg)	800	743	707
Arena (0-4) (kg)	1062	986	938
Arena Fina (0-0,3) (kg)	99	92	87
Aditivo Rhebouildt 1000 (%)	1,20	1,80	2,80

Se han fabricado 4 probetas de cada dosificación que se han curado durante 28 días en cámara húmeda a 25 °C y 90% de humedad.

2.2. Preparación y fisuración de las muestras

De las probetas cilíndricas anteriores, se realizan por corte, rodajas de 20 mm de espesor. Estas rodajas se fisuran con una máquina universal de ensayos aplicando una carga de compresión en dos generatrices opuestas por control de desplazamiento, Figura 1-izquierda.

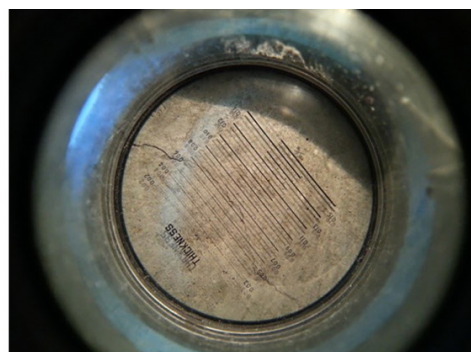


Figura 1. Sistema de fisuración de rodajas de hormigón empleado. Fisurómetro Mitutoyo usado para medida de ancho de fisura.

El ancho de fisura obtenido después de retirar la carga se encuentra entre los 0,03 y 0,7 mm, Figura 1-derecha, las cuales se han medido con un fisurómetro Mitutoyo, 1-centro. En la Tabla 2 se resume la relación de muestras con su referencia y el ancho de la fisura.

Tabla 2. Resumen de rodajas ensayadas según cantidad de cemento y ancho de fisura.

300 kg		360 kg		400 kg	
Muestra	Fisura (mm)	Muestra	Fisura (mm)	Muestra	Fisura (mm)
REF 300	0,00	REF 360	0,00	REF 400	0,00
300-1	0,06	360-1	0,03	400-1	0,07
300-2	0,09	360-2	0,05	400-2	0,12
300-3	0,40	360-3	0,18	400-3	0,25
300-4	0,45	360-4	0,35	400-4	0,30
		360-5	0,45	400-5	0,30
		360-6	0,50	400-6	0,40
		360-7	0,70		

2.3. Procedimiento de ensayo

Tanto las muestras fisuradas como las de referencia no fisuradas, se ensayan según la norma UNE 83987 “Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirregimen”, Figura 2. Este método acelerado se basa en la migración del ión cloruro a través del hormigón, por aplicación de un campo eléctrico externo (22). La muestra de hormigón, tras su acondicionamiento, se coloca entre dos disoluciones, una de ellas, contiene una disolución de NaCl 1M, en la cual, los iones cloruro podrán migrar a través del hormigón hasta la segunda disolución de agua destilada, facilitado por la aplicación de una diferencia de potencial de 12V entre electrodos (ánodo y cátodo) colocados uno en cada disolución. El aumento de iones cloruros en la disolución de agua destilada se cuantifica por la medida de la conductividad eléctrica de la disolución.

Los iones cloruros al atravesar el hormigón lo hacen en dos fases, primero mediante un estado no estacionario, en el cual, los iones cloruro pueden reaccionar con componentes del hormigón y, por tanto, su paso es más lento, y después mediante un estado estacionario, en el que el cloruro que debía reaccionar ya lo ha hecho y su paso ya solo es controlado por el impedimento que se encuentre (porosidad, rugosidad, etc).



Figura 2. Montaje de ensayo multirégimen según norma UNE 83987.

Los coeficientes de difusión obtenidos a través del método expuesto en la norma (22), son los correspondientes al periodo estacionario (D_s) y al no estacionario (D_{ns}).

El coeficiente de difusión estacionario se calcula a través de la siguiente ecuación [1]:

$$[1] \quad D_s = \frac{A \cdot R \cdot T \cdot l}{z \cdot S \cdot F \cdot Cl \cdot \gamma \cdot \Delta \Phi_{ss}}$$

Donde:

- D_s es el coeficiente de difusión de cloruros en estado estacionario, en cm^2/s ;
- A es la pendiente de la ecuación de regresión lineal del periodo estacionario (mol/s);
- R es la constante de los gases perfectos, en cal/molK (1,9872);
- T es la temperatura media del anolito durante el ensayo, en K;
- l es el espesor de la muestra, en cm;
- z es la valencia del ión cloruro ($z=1$);
- S es el área superficial de la muestra expuesta en la disolución de cloruros, en cm^2 ;
- F es la constante de Faraday, en cal/Vmol (23060);
- Cl^- es la concentración inicial de cloruro en el catolito, en mol/cm^3 ;
- γ es el coeficiente de actividad de la disolución del catolito (0,657) (23);
- $\Delta \Phi_{ss}$ es el voltaje efectivo medio ponderado durante el periodo estacionario, en V.

Y el no estacionario según las ecuaciones [2, 3, 4]:

$$[2] \quad D_{ns} = \frac{e^2}{2 \cdot t_{paso} \cdot \varphi}$$

$$[3] \quad \varphi = \frac{z \cdot F}{R \cdot T} \cdot \Delta \phi$$

$$[4] \quad \Delta \phi = \frac{\Delta E}{e}$$

Donde:

- D_{ns} es el coeficiente de difusión de cloruros en el estado no estacionario, en cm^2/s ;
- E es el espesor de la probeta, en cm;
- t es el tiempo de paso, en s;
- φ es el factor de aceleración del campo eléctrico (39,61 para 20°C);
- $\Delta \Phi$ es el campo eléctrico normalizado, en V/cm ;
- T es la temperatura media del anolito durante el ensayo, en K;
- Z es la valencia del ion para el cloruro;
- R es la constante de los gases ideales, en cal/molK (1,9872);
- F es la constante de Faraday, en cal/Vmol (23063);

Una vez obtenidos los coeficientes de difusión se pueden aplicar las ecuaciones propuestas en la normativa, en este caso en la EHE-08 (9) en su Anejo 9, condiciones adicionales sobre durabilidad, para tratar de obtener el periodo de iniciación por corrosión de las armaduras.

3. RESULTADOS

A modo de ejemplo, se muestra uno de los resultados del ensayo multirégimen para las muestras fisuradas y no fisurada de la amasada de 360 kg de cemento por m³ de hormigón, Figura 3. Como se observa, hay dos fases en el ensayo de la probeta de referencia sin fisuras, una primera en la que no se detecta la llegada del cloruro al depósito inicialmente sin cloruros. Esto es debido a que el cloruro está atravesando el grosor de la probeta y reaccionando con las fases hidratadas del cemento. Luego se detecta una fase (la estacionaria) en la que el cloruro ya aparece en el depósito de recogida, aumentando su concentración paulatinamente de forma regular (al menos las primeras horas). Este aumento, si es lineal, indica un régimen estacionario. En la fase inicial de no detección de cloruros, la fase no estacionaria es casi inexistente en las muestras fisuradas frente a la no fisurada, indicando que el cloruro pasa casi libremente sin impedimentos al depósito de recogida.

Los valores de los coeficientes de las dos fases para los tres hormigones y los anchos de fisura ensayados se dan en la Figura 4 donde se precia como aumenta el coeficiente (relación entre el coeficiente fisurado D_f , y el coeficiente no fisurado D_o) con el ancho de fisura. También se deduce que el contenido en cemento no es relevante ya que los valores de los coeficientes de difusión son globalmente similares entre los hormigones, tal vez porque la relación a/c es la misma en los tres hormigones.

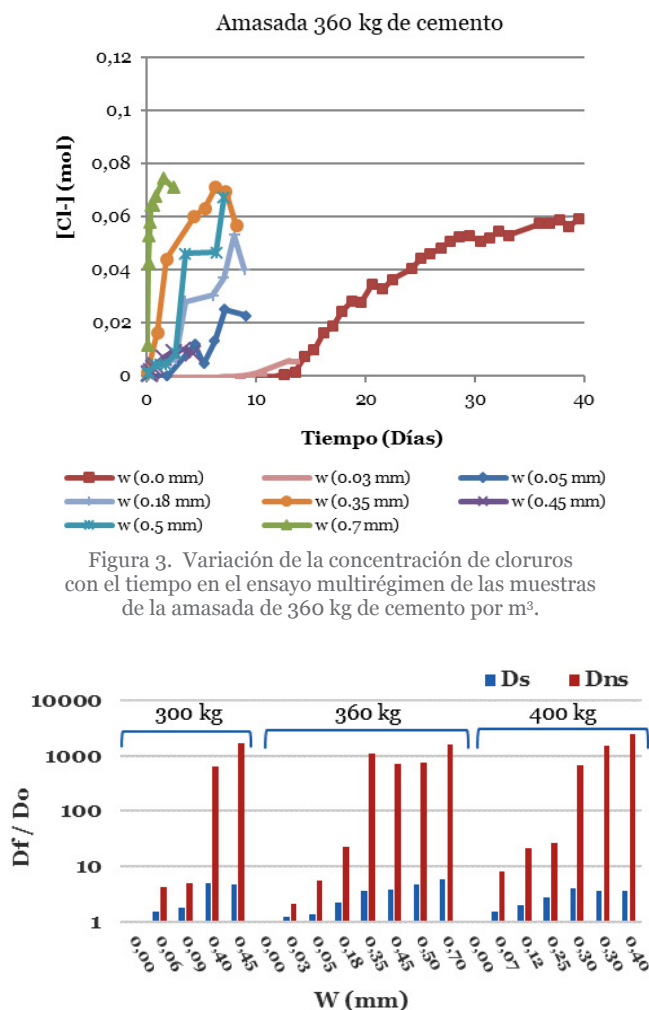


Figura 4. Coeficientes de difusión obtenidos.

En la Figura 5 se representan los dos coeficientes frente al ancho de fisura ensayado por separado. Los coeficientes de difusión estacionarios aumentan linealmente con el ancho de fisura independientemente del contenido en cemento y, por lo tanto, se pueden tratar todos los datos como si proviniesen de la misma población, mientras que los no estacionarios indican la existencia de una fisura crítica, entre 0,2 y 0,3 mm, a partir de la cual los D_{ns} aumentan dramáticamente.

Este comportamiento permite deducir que para tamaños menores a la fisura crítica, el comportamiento de la difusión no estacionaria depende del tamaño, mientras que cuando la fisura es mayor que la crítica, los coeficientes no dependen del ancho y penetran los cloruros libremente. Para ambos coeficientes, estacionario y no estacionario, se han encontrado relaciones con el ancho de fisura. Así, el ajuste de la línea de tendencia a estas representaciones da como resultado las siguientes ecuaciones [5 y 6]:

Coefficiente estacionario:

$$[5] \quad D_s = 1,03 \cdot 10^{-7} \cdot w + 1,54 \cdot 10^{-8}$$

Coefficiente no estacionario:

$$[6] \quad D_{ns} = 8,25 \cdot 10^{-8} \cdot e^{13,1 \cdot w}$$

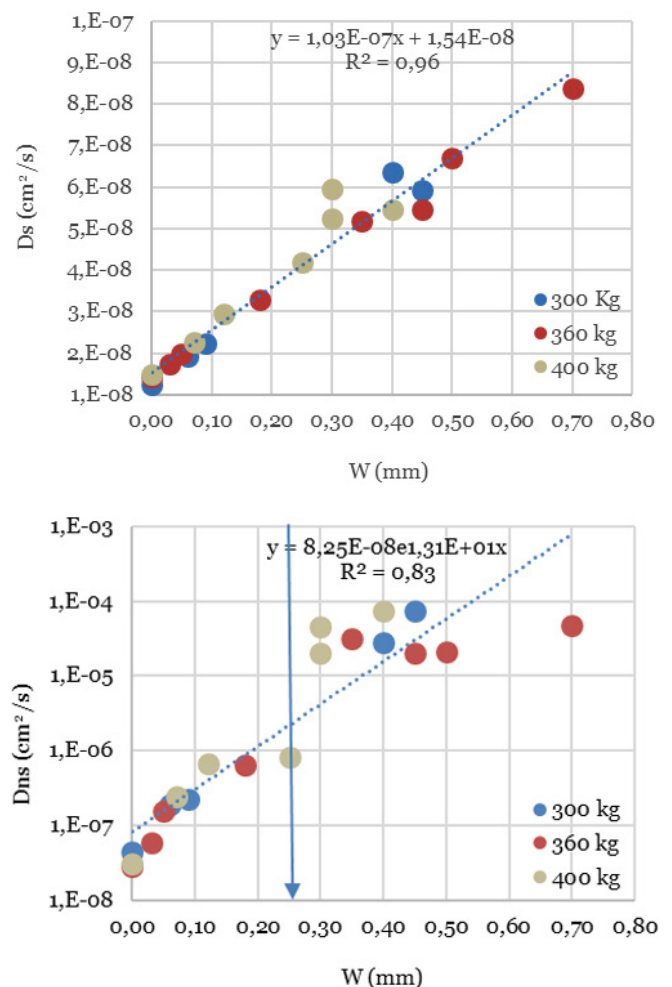


Figura 5. Coeficientes de difusión estacionario y no estacionario según ancho de fisura.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten diversas consideraciones, de las que en el presente trabajo se abordaran solo algunas, las más relacionadas con el uso de los valores para el cálculo de la vida útil según indican los modelos disponibles. También, a título de ejemplo, se abordará una comparación con los resultados obtenidos por Baroghel-Bouny et al (19).

4.1. Selección del coeficiente para el cálculo de la vida útil

A la vista de los resultados una primera cuestión es cuál de los coeficientes obtenidos es el más adecuado para aplicarlo al cálculo de la vida útil. Normalmente el utilizado es el no estacionario D_{ns} ya que tiene en cuenta tanto el transporte como la reacción, ya que en la realidad no se suele alcanzar nunca un régimen estacionario dado que el frente de avance del cloruro siempre va a suponer nueva reacción con las fases hidratadas del cemento. Sin embargo, en el caso de elementos fisurados si podría ser posible que se produzca un régimen estacionario a partir del ancho de fisura crítica ya que la zona de la fisura no supone un impedimento físico para la movilidad de los cloruros. Esta consideración posible no se aborda en el presente trabajo que se centrará en el uso de los coeficientes de difusión obtenidos de la fase no estacionaria que es el supuesto que se encuentra en las ecuaciones de la EHE o8 (9) y similares como el Código Modelo (10).

4.2. Cálculo del periodo de iniciación

El periodo de iniciación debido a la penetración de cloruros, viene regido por un proceso difusivo a través del hormigón que según la EHE-o8 puede modelizarse a través de la siguiente ecuación [7]:

$$[7] \quad d = K_{cl} \sqrt{t}$$

Donde:

- d es la profundidad (mm);
- t es el tiempo (años);
- K_{cl} es el coeficiente de penetración de Cloruros;

Este periodo de tiempo es el necesario para que la concentración de cloruros a la altura del refuerzo, tome un valor crítico que haga que se despase el acero y comience la corrosión.

Para el cálculo de este tiempo, ecuación [8], si no se tiene en cuenta el envejecimiento, es decir, considerando un coeficiente de difusión constante, se calcula el coeficiente de penetración de cloruros, K_{cp} , según la ecuación [9]:

$$[8] \quad t = \left(\frac{d}{K_{cl}} \right)^2$$

$$[9] \quad K_{cl} = \alpha \sqrt{12 D_w} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right)$$

Donde:

- α es el factor de conversión de unidades, su valor es de 56157;
- D_w es el coeficiente de difusión efectivo, para un ancho de fisura (cm^2/s);
- C_{th} es la concentración de cloruros crítica, (% peso de cemento);
- C_s es la concentración de cloruros en superficie (% peso de cemento);
- C_b es el contenido de cloruros en materias primas (% peso de cemento);

En este estudio se ha tomado como coeficiente de difusión no estacionario, D_{ns} , el valor obtenido en el ensayo multi-régimen de los hormigones fisurados, Tabla 3. La concentración de cloruros crítica, C_{th} , el valor de 0,6 % en peso de cemento, que reseña la EHE-o8 para armaduras pasivas. La concentración superficial, C_s , que depende de las condiciones de exposición y que, a falta de valores experimentales, se toma el valor de la tabla A.9.4. del anejo 9 de la EHE-o8, estos valores en % de cemento se resumen en la Tabla 4. El contenido en cloruros, C_b , en las materias primas utilizadas se toma como cero.

El valor del recubrimiento del refuerzo utilizado para el cálculo del tiempo del periodo de iniciación, profundidad (d), también viene referenciado en la EHE-o8 según el tipo de cemento, ambiente marino y la vida útil del proyecto, el resumen de estos valores se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración superficial en % en peso de cemento y recubrimiento mínimo según ambiente marino y amasada.

	Ambiente marino IIIa según EHE-o8		
	C_s	Recubrimiento (mm) 50 años vida útil	Recubrimiento (mm) 100 años vida útil
300 kg	1,092	45	65
360 kg	0,894	45	65
400 kg	0,802	45	65

Tabla 3. Coeficientes de difusión de muestras ensayadas.

Amasada	300 kg							
W (mm)	0,00	0,06	0,09	0,40	0,45			
Dns (cm²/s)	4,44E-08	1,90E-07	2,25E-07	2,82E-05	7,32E-05			
Amasada	360 kg							
W (mm)	0,00	0,03	0,05	0,18	0,35	0,45	0,50	0,70
Dns (cm²/s)	2,89E-08	6,02E-08	1,58E-07	6,43E-07	3,18E-05	2,02E-05	2,14E-05	4,69E-05
Amasada	400 kg							
W (mm)	0,00	0,07	0,12	0,25	0,30	0,30	0,40	
Dns (cm²/s)	3,04E-08	2,42E-07	6,64E-07	8,10E-07	2,03E-05	4,59E-05	7,36E-05	

Los resultados de la duración de los periodos de iniciación según el ancho de fisura, para el ambiente considerado, se observa en la Figura 6. Dos aspectos son resaltables de los resultados: 1) que la vida útil disminuye con el ancho de fisura como era deducible de las Figuras anteriores y 2) que a pesar de que los coeficientes son muy similares en los tres hormigones, el resultado de su vida útil difiere. Ello es debido a la diferencia en concentración superficial que indica el modelo de la EHE o8: a mayor C_s (hormigón con menor contenido en cemento) menor vida útil resulta del cálculo.

Partiendo de las ecuaciones [8] y [9], sustituyendo los coeficientes de difusión no estacionarios obtenidos en el ensayo de multirregimen, se obtiene la relación entre los periodos de iniciación de hormigón fisurado y no fisurado.

En la Figura 7, se observa el ajuste de los datos, que relaciona la variación del periodo de iniciación con el ancho de fisura, reproduce los datos experimentales independientemente de la dosificación y ambiente en el que esté expuesto el hormigón.

Por tanto, un elemento fisurado en ambiente marino con ancho máximo permitido según la EHE-o8 de 0,4 mm, ve reducida su vida útil en un 99 %.

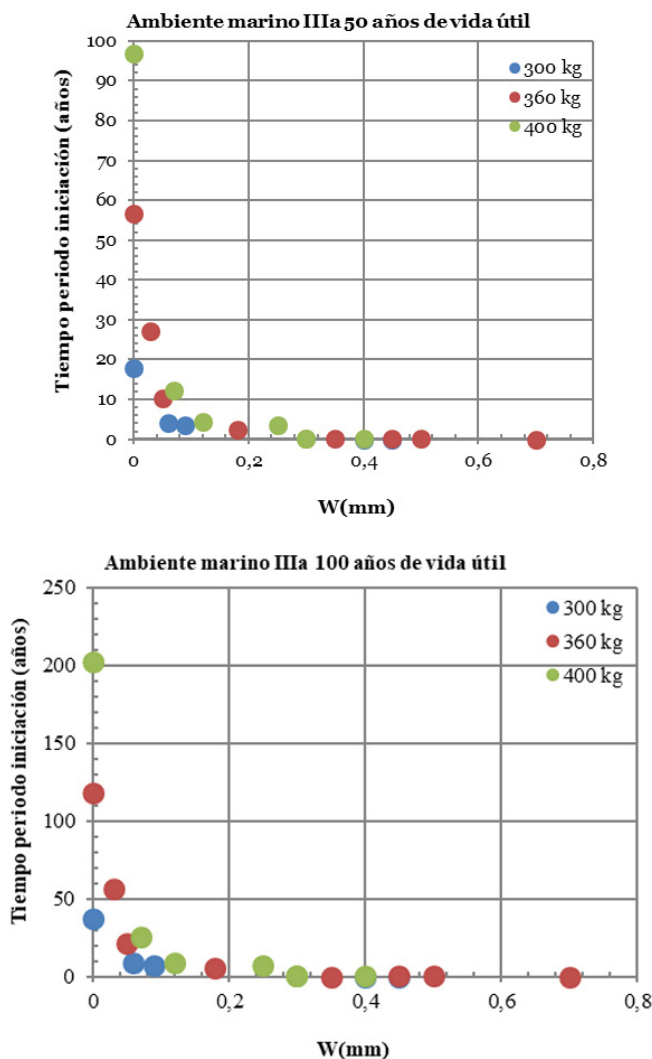


Figura 6. Variación del periodo de iniciación en ambiente marino IIIa según ancho de fisura para 50 y 100 años de vida útil.

4.3. Comparación con resultados de bouny

Con el objetivo de explorar la posibilidad de generalizar los resultados con los obtenidos es necesario compararlos con los de otros autores. Aquí, se van a comparar con lo realizado por el equipo de Baroguel Bouny (19) que utilizan el método desarrollado anteriormente por otros autores (18) sobre el empleo de un área “equivalente de fisura” para referir el coeficiente de difusión obtenido. No se va a profundizar en este método de tratamiento sino, solo se van a utilizar sus coeficientes para compararlos a igualdad de ancho de fisura con los resultados presentes. Así en la Figura 8 se han representado sus coeficientes de difusión no estacionarios publicados en (19) y los obtenidos en los tres hormigones estudiados en este trabajo.

Una diferencia que surge inmediatamente es que en su caso aparece una fisura crítica (véase Figura 9) para este coeficiente diferente al que se ha encontrado aquí. Es decir, al calcular el coeficiente referido al área equivalente de fisura, en su trabajo aparece que hasta su fisura crítica de casi 0,1 mm no hay diferencia con el hormigón sin fisurar mientras que en este trabajo la fisura crítica sería de alrededor de 0,04 mm, obteniendo en (19) coeficientes mayores a los presentes. Esta discrepancia que se ha querido ilustrar indica que es necesario ensayar nuevas series de hormigones para poder generalizar con garantías estadísticas las tendencias encontradas.

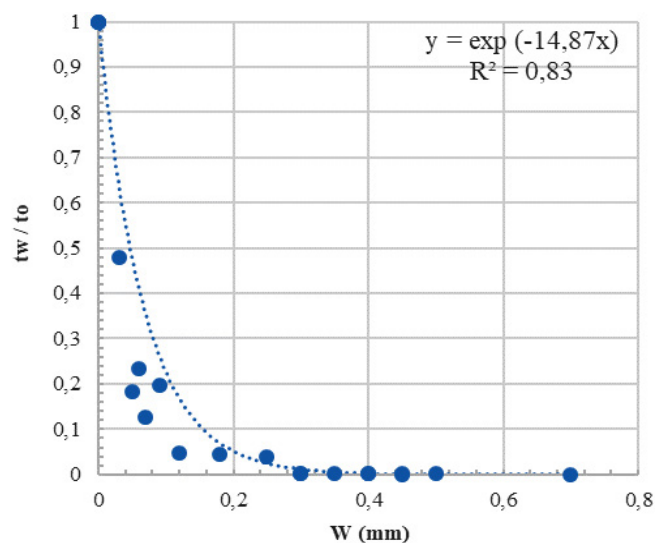


Figura 7. Relación entre la variación del periodo de iniciación frente al ancho de fisura.

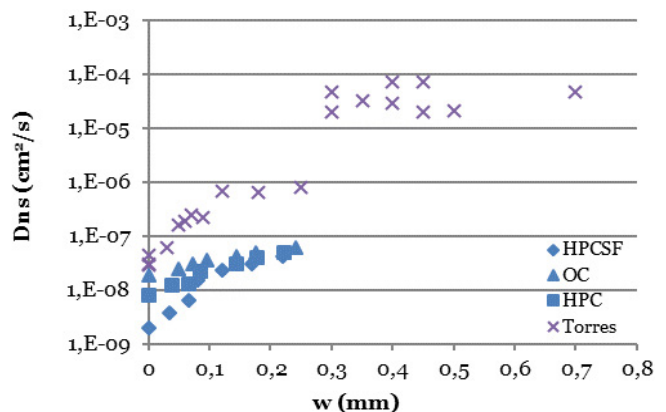


Figura 8. Comparación de estudios de la relación entre tamaño de fisura y coeficiente de difusión no estacionario.

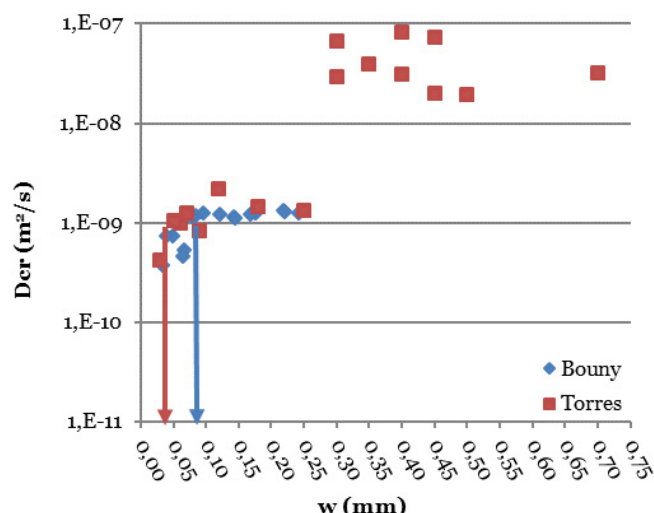


Figura 9. Comparación de estudios tamaño de fisura crítico y coeficiente de difusión en fisura.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este estudio se resumen a continuación:

- La relación entre el coeficiente de difusión del ion cloruro en hormigones fisurados y no fisurados es independiente del contenido en cemento del hormigón tal vez porque la relación a/c es la misma en las tres dosificaciones.
- La relación entre el ancho de fisura y el coeficiente de difusión no estacionario encontrada se ajusta a la ecuación [6].
- Aplicando estos valores a las formulas de la EHE 08 y suponiendo el resto de valores de los parámetros constitutivos de esas ecuaciones, resulta que la vida útil en elementos fisurados respecto a los no fisurados se puede ajustar a la expresión [10]:

$$[10] \quad \frac{t_w}{t_{w=0}} = e^{-14,87w}$$

- Se han encontrado discrepancias en el ancho de fisura crítico para los coeficientes en estado estacionario publicados en (19) y los presentes, lo que lleva a indicar la necesidad de seguir ensayando nuevos hormigones hasta encontrar relaciones entre la variación del coeficiente de difusión con el ancho de fisura que puedan ser generalizables con garantías de tipo estadístico.

REFERENCIAS

- (1) Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Institute (CBI) n° 4-82. Stockholm
- (2) Sergi, G., Yu, S.W., Page, C.L. (1992). Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment. *Magazine of Concrete Research*, 44(158): 63-69. <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.158.63>
- (3) Saetta, A., Scotta, R., Vitaliani, R. (1993). Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 90 (5): 441-451. <https://doi.org/10.14359/3874>
- (4) Climent, M.A., Vera, G. de, López, J.F., Viqueira, E., Andrade, C. (2002). A test method for measuring chloride diffusion coefficients through non-saturated concrete. Part I: the instantaneous plane source diffusion case. *Cement and Concrete Research*, 32(7): 1113-1123. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00750-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00750-0)
- (5) Vera, G. de, Climent, M.A., Viqueira, E., Antón, C., Andrade, C. (2007). A test method for measuring chloride diffusion coefficients through partially saturated concrete. Part II: the instantaneous plane source diffusion case with chloride binding consideration. *Cement and Concrete Research*, 37 (5): 714-724. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.008>
- (6) Bamforth, P., Chapman-Andrews, J. (1994). Long term performance of RC elements under U.K. coastal exposure conditions. In *International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, (pp. 139-156). N. Swamy (Ed), Sheffield Academic Press.
- (7) Izquierdo, D., Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. (2004). Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation. Experimental and statistical study. *Electrochimica Acta*, 49 (17-18): 2731-2739. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.034>
- (8) Pachón-Montaña, A., Sánchez-Montero, J., Andrade, C., Julea, J., Moreno, E., Matres, V. (2018). Threshold concentration of chlorides in concrete for stainless steel reinforcement: Classic austenitic and new duplex stainless steel. *Construction and Building Materials*, 186: 495-502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.081>
- (9) EHE – 08 Instrucción de hormigón estructural. Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.
- (10) Model code 2010: final draft, Bulletin, 65. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2012.
- (11) Andrade, C. (2014). 2013 W.R. Whitney Award Lecture: Probabilistic Treatment of the Reinforcement Corrosion. *Corrosion*, 70 (6): 643-651. <https://doi.org/10.5006/1049>
- (12) Izquierdo, D., Andrade, C. (2009, noviembre). Calibración de modelos para establecer un Estado Límite de Durabilidad. En *VII Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento*, Málaga, España.
- (13) Andrade, C., D'Andrea, R. (2009, noviembre). Análisis crítico de modelos de cálculo de la vida útil de la armadura del hormigón en medios marinos. En *VII Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento*, Málaga, España.
- (14) Beeby, A. (1982). Cracking, cover and corrosion of reinforcement. *Transactions and Journal of British Ceramic Society*, 81 (3): 63-66.
- (15) Jang, S.Y., Kim, B.S., Oh, B.H. (2011). Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. *Cement and Concrete Research*, 41 (1): 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.018>
- (16) Gérard, B., Marchand, J. (2000). Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime. *Cement and Concrete Research*, 30 (1): 37-43. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00201-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00201-X)

- (17) Šavija, B., Pacheco, J., Schlangen, E., Polder, R.B. (2012, 11-13 April). Meso-scale simulation of chloride ingress in cracked concrete. In *Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*, Amsterdam, The Netherlands.
- (18) Tognazzi, C., Torrenti, J.M., Carcasses, M., Ollivier, J.P. (2000). Coupling between diffusivity and cracks in cement-based systems. *Concrete Science and Engineering*, 2: 176-181.
- (19) Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-Bouny, V. (2008). Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (6): 877-883. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.007>
- (20) Marsavina, L., Audenaert, K., Schutter, G. de, Faur, N., Marsavina, D. (2009). Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (1): 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.015>
- (21) Jin, W.L., Yan, Y.D., & Wang, H.L. (2010). Chloride diffusion in the cracked concrete. In B.H. Oh, et al. (eds). *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures*. Seoul: Korea Concrete Institute.
- (22) AENOR (2014). UNE 83987 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirrégimen. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (23) Hidalgo, A., Vera, G. de, Climent, M.A., Andrade, C., Alonso, C. (2001). Measurements of chloride activity coefficients in real portland cement paste pore solutions. *Journal of the American Ceramics Society*, 84 (12): 3008-3012. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb01128.x>

* * *